

REDUKSI ORDE PLANT DAN PENGENDALI DENGAN MENGGUNAKAN METODE PEMOTONGAN SETIMBANG

Abdul Wachid, Widowati
Jurusan Matematika FMIPA UNDIP Semarang
Jl. Prof. H. Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, 50275

Abstrak: Makalah ini mengemukakan metode pemotongan setimbang untuk mereduksi orde plant dan pengendali dari sistem linear tak berubah terhadap waktu. Adapun prosedur dari metode tersebut adalah sebagai berikut: mula-mula realisasi ruang keadaan dari plant dan pengendali disetimbangkan dengan menggunakan transformasi similaritas. Ketika sistem disetimbangkan, maka nilai singular sistem berurut turun dari besar ke kecil. Kemudian, keadaan (*state*) yang bersesuaian dengan nilai singular kecil dipotong sehingga diperoleh plant/pengendali berorde rendah. Selanjutnya syarat perlu untuk kestabilan dari plant tereduksi diberikan. Syarat perlu dan cukup untuk eksistensi pengendali juga dikemukakan. Sebagai verifikasi dari metode yang dikemukakan, pengendali berorde rendah yang diperoleh diaplikasikan ke struktur elastis untuk meredam getaran transversal dan torsional. Akan dibandingkan kinerja pengendali berorde rendah yang diperoleh melalui reduksi orde plant dan reduksi orde pengendali.

Kata Kunci: Metode pemotongan setimbang, norm H_∞ , pengendali berorde rendah

PENDAHULUAN

Desain pengendali dengan menggunakan teknik kendali modern, seperti teknik kendali H_∞ atau μ sintesis menghasilkan pengendali dengan orde yang sama dengan orde dari plant yang digunakan dalam pendesainan. Sehingga aplikasi teknik tersebut pada plant berorde tinggi akan menghasilkan pengendali berorde tinggi pula. Dari segi analisis dan sintesis, pengendali seperti ini kurang efisien, karena mempunyai kompleksitas komputasi yang besar [7]. Hal ini berkaitan dengan waktu komputasi yang lebih lama dibandingkan dengan waktu komputasi dalam pendesainan pengendali berorde rendah.

Oleh karena itu pada makalah ini akan dibahas tentang masalah reduksi, dalam rangka memperoleh pengendali berorde rendah. Disini akan dikemukakan dua cara untuk memperoleh pengendali berorde rendah. Pada cara 1, plant berorde tinggi terlebih dahulu direduksi, kemudian suatu pengendali berorde rendah didesain dari plant tereduksi tersebut. Pada cara 2, mula-mula dari plant berorde tinggi didesain pengendali berorde tinggi, kemudian orde pengendali ini direduksi.

Masalah reduksi orde plant dengan menggunakan metode pemotongan setimbang telah dikaji oleh beberapa peneliti [2, 5]. Enns [2] telah meneliti batas atas terkecil dari kesalahan reduksi. Moore [5] telah mengkaji keterkontrolan dan keterobservasian dari sistem tereduksi. Sedangkan masalah reduksi orde pengendali dengan menggunakan metode pemotongan setimbang telah dikemukakan oleh Zhou, et. al., [8]. Pada makalah ini, akan dibandingkan kinerja pengendali berorde rendah yang diperoleh melalui reduksi orde plant dan pengendali. Metode yang dikemukakan akan diverifikasi dengan mengaplikasikan pengendali berorde rendah yang diperoleh melalui dua cara diatas, ke struktur elastis untuk meredam getaran transversal dan torsional.

REDUKSI ORDE PLANT

Pada bagian ini, dibahas mengenai reduksi orde plant (cara 1) dengan menggunakan metode pemotongan setimbang yang telah dikembangkan oleh Enns [2]. Pandang plant berorde- n , linear, invarian terhadap waktu, stabil asimtotik dan minimal sebagai berikut:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad x(t_0) = x_0 \quad y(t) = Cx(t) + Du(t), \quad (1)$$

Fungsi alih yang berkorespondensi dengan (1) adalah $G_n(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$.

Grammian keterkendalian dan keterobservasian pada persamaan (1), didefinisikan [4, 7] sebagai berikut.

$$P = \int_0^\infty e^{At} B B^T e^{A^T t} dt, Q = \int_0^\infty e^{A^T t} C^T C e^{At} dt. \quad (2)$$

dengan $P > 0$, $Q > 0$ adalah solusi persamaan Lyapunov:

$$AP + PA^T + BB^T = 0, \quad QA + A^T Q + C^T C = 0. \quad (3)$$

Dengan menggunakan transformasi similar [2, 3] dapat diperlihatkan bahwa

$$P = Q = \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), \quad (4)$$

dengan $\sigma_i \geq \sigma_{i+1}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n-1$, σ adalah nilai singular.

Berikut diberikan langkah-langkah metode pemotongan setimbang untuk mereduksi plant (1).

1. Menyetimbangkan plant dengan prosedur seperti di bawah ini.

- Realisasi dari plant pada persamaan (1) dapat ditulis sebagai (A, B, C, D) .
- Selanjutnya $state$ $x(t)$ ditransformasi dengan matriks non singular

$T = \Sigma^{1/2} U^T N^{-1}$ oleh $\tilde{x}(t) = T x(t)$, sehingga realisasinya menjadi $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D})$ dengan $\tilde{A} = T A T^{-1}$, $\tilde{B} = T B$, $\tilde{C} = C T^{-1}$, $\tilde{D} = D$.

- Grammian keterkendalian dan keterobservasiannya menjadi

$$\tilde{P} = \int_0^\infty e^{\tilde{A}t} \tilde{B} \tilde{B}^T e^{\tilde{A}^T t} dt = T P T^{-1}, \quad \tilde{Q} = \int_0^\infty e^{\tilde{A}^T t} \tilde{C}^T \tilde{C} e^{\tilde{A}t} dt = T^{-T} Q T^{-1}. \quad (5)$$

- Substitusikan $T = \Sigma^{1/2} U^T N^{-1}$ ke persamaan (5), sehingga didapat

$$\tilde{P} = (\Sigma^{1/2} U^T N^{-1}) N N^T (N^{-T} U \Sigma^{1/2}) = \Sigma, \quad (6)$$

$$\tilde{Q} = (\Sigma^{-1/2} U^T N^T) Q (N U \Sigma^{-1/2}) = \Sigma^{-1/2} U^T U \Sigma^2 U^T U \Sigma^{-1/2} = \Sigma. \quad (7)$$

- Diperoleh realisasi setimbang $(\tilde{A}, \tilde{B}, \tilde{C}, \tilde{D})$ yang memenuhi

$$\tilde{P} = \tilde{Q} = \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n), \quad (8)$$

dengan $\sigma_1 \geq \sigma_{i+1} \geq \dots \geq \sigma_r \geq \sigma_{r+1} \geq \dots \geq \sigma_n$, $\sigma_i = \sqrt{\lambda_i(\tilde{P} \tilde{Q})}$.

2. Mempartisi plant setimbang yang bersesuaian dengan Grammian $\Sigma = \text{diag}(\Sigma_1, \Sigma_2)$ yakni

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \tilde{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}, \tilde{C} = [C_1 \quad C_2], \quad (9)$$

dengan A_{11} dan Σ_1 adalah matriks berukuran $r \times r$ ($r < n$), $\Sigma_1 = \text{diag}(\sigma_1, \dots, \sigma_r)$, dan

$\Sigma_2 = \text{diag}(\sigma_{r+1}, \dots, \sigma_n)$.

Persamaan dinamik plant setimbang berorde n , dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} y(t), u(t) = [C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, x_1(t) \in R^r, x_2(t) \in R^{n-r}.$$

3. Lakukan pemotongan $state$ pada realisasi setimbang tersebut yang bersesuaian dengan nilai singular kecil, sehingga diperoleh plant tereduksi dengan persamaan dinamik,

$$\dot{x}_r(t) = A_r x_r(t) + B_r u_r(t), \quad y_r(t) = C_r x_r(t) + D_r u_r(t),$$

dengan $A_r = A_{11}$, $B_r = B_1$, $C_r = C_1$, $D_r = \tilde{D}$.

Syarat perlu untuk kestabilan plant tereduksi diberikan dalam teorema berikut.

Teorema 1. [7] Jika Σ_1 dan Σ_2 tidak mempunyai elemen diagonal yang sama, maka (A_{11}, B_1, C_1, D) stabil asimtotik.

Berikut diberikan teorema besarnya kesalahan reduksi dari metode pemotongan setimbang.

Teorema 2. [2, 4] Jika $G_n(s) = C(sI - A)^{-1}B + D$ dengan (A, B, C, D) realisasi setimbang dan terpartisi seperti pada persamaan (9). Misalkan (A_{11}, B_1, C_1, D) adalah pemotongan setimbang dari (A, B, C, D) dengan $G_r(s) = C_1(sI_r - A_{11})^{-1}B_1 + D$ maka $\|G_n(s) - G_r(s)\|_\infty \leq 2(\sigma_{r+1} + \dots + \sigma_n) = 2 \text{tr } \Sigma_2$.

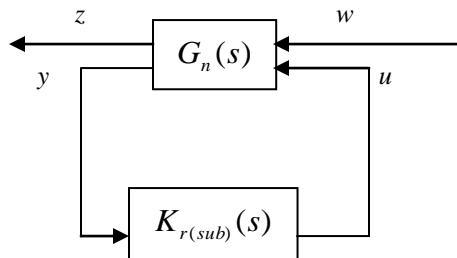
EKSISTENSI PENGENDALI

Syarat perlu dan cukup untuk eksistensi pengendali suboptimal H_∞ akan dipaparkan dalam bagian ini, untuk itu diberikan beberapa asumsi dari realisasi fungsi alih $G(s)$ yang ditulis dalam bentuk

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & \vdots & B_1 & B_2 \\ \vdots & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_1 & \vdots & 0 & D_{12} \\ \vdots & & & \\ C_2 & \vdots & D_{21} & 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Asumsi-asumsi yang digunakan adalah

- (i). (A, B_1) adalah terkendali dan (C_1, A) adalah terobservasi;
- (ii). (A, B_2) adalah dapat distabilkan dan (C_2, A) adalah terdeteksi;
- (iii). $D_{12}^T [C_1 \ D_{12}] = [0 \ I]$;
- (iv). $\begin{bmatrix} B_1 \\ D_{21} \end{bmatrix} D_{21}^T = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}$.



Gambar 1. Sistem Lup Tertutup

Diagram blok dari sistem lup tertutup diberikan pada Gambar 1, dengan $G(s)$ adalah plant dan K adalah pengendali (*controller*) yang diasumsikan riil, rasional dan *proper* [7], w adalah masukan dari luar (bisa berupa gangguan), u adalah masukan kendali, y adalah keluaran yang diukur dan z adalah keluaran

yang dikendalikan. Suatu pengendali dikatakan diperkenankan jika pengendali tersebut menstabilkan plant (secara internal). Eksistensi dari pengendali suboptimal H_∞ diberikan pada teorema berikut.

Teorema 3. [1, 7] Terdapat pengendali yang diperkenankan sehingga $\|T_{zw}\|_\infty < \gamma$ jika dan hanya jika tiga kondisi berikut dipenuhi

$$\begin{aligned} (i) \quad & H_\infty \in \text{dom}(\text{Ric}) \quad \text{dan} \quad X_\infty := \text{Ric}(H_\infty) > 0; \quad H_\infty = \begin{bmatrix} A & \gamma^{-2}B_1B_1^* - B_2B_2^* \\ -C_1C_1^* & -A^* \end{bmatrix} \\ (ii) \quad & J_\infty \in \text{dom}(\text{Ric}) \quad \text{dan} \quad Y_\infty = \text{Ric}(J_\infty) > 0; \quad J_\infty = \begin{bmatrix} A^* & \gamma^{-2}C_1C_1^* - C_2^*C_2 \\ -B_1B_1^* & -A \end{bmatrix} \\ (iii) \quad & \rho(X_\infty, Y_\infty) < \gamma^2 \end{aligned}$$

jika ketiga kondisi ini dipenuhi maka, salah satu pengendalinya adalah

$$K_{sub}(s) = \begin{bmatrix} \hat{A}_\infty & : & -Z_\infty L_\infty \\ \vdots & & \vdots \\ \dots & : & \dots \\ F_\infty & : & 0 \\ \vdots & & \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_K & : & B_K \\ \vdots & & \vdots \\ \dots & : & \dots \\ C_K & : & 0 \\ \vdots & & \vdots \end{bmatrix} \quad (11)$$

dengan $\hat{A}_\infty = A + \gamma^{-2}B_1B_1^*X_\infty + B_2F_\infty + Z_\infty L_\infty C_2$, $F_\infty = -B_2^*X_\infty$, $L_\infty = -Y_\infty C_2^*$, $Z_\infty = (I - \gamma^{-2}Y_\infty X_\infty)^{-1}$.

REDUKSI ORDE PENGENDALI

Pada bagian ini akan dikaji reduksi orde pengendali (cara 2) dengan metode pemotongan setimbang. Misal diberikan pengendali berorde tinggi m dengan persamaan dinamik sebagai berikut.

$$\dot{x}_k(t) = A_K x_k(t) + B_K y(t), \quad u(t) = C_K x_k(t). \quad (12)$$

Selanjutnya, akan dicari pengendali tereduksi \tilde{K} berorde r ($r < m$) dengan persamaan dinamik,

$$\dot{x}_{k1}(t) = \tilde{A}_k x_{k1}(t) + \tilde{B}_k y(t), \quad u(t) = \tilde{C}_k x_{k1}(t) + \tilde{D}_k y(t). \quad (13)$$

Adapun langkah-langkah untuk mereduksi orde pengendali [8] adalah sebagai berikut.

1. Menyetimbangkan sistem dengan langkah-langkah sebagai berikut.

Plant yang diperumum dapat dituliskan sebagai

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t), \quad z(t) = C_1 x(t) + D_{12} u(t), \quad y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t). \quad (14)$$

Sistem lup tertutup dengan pengendali berorde tinggi dinyatakan dalam bentuk

$$T_{zw} = \begin{bmatrix} \bar{A} & : & \bar{B} \\ \vdots & & \vdots \\ \dots & : & \dots \\ \bar{C} & : & O \end{bmatrix}, \quad \text{dengan} \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A & B_2 C_K \\ B_K & A_K \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_K D_{21} \end{bmatrix}, \quad \bar{C} = [C_1 \quad D_{12} C_K].$$

Diasumsikan bahwa sistem lup tertutup T_{zw} stabil dan terdapat $U = \text{diag}(U_1, U_2)$ dan $V = \text{diag}(V_1, V_2)$, dengan U dan V adalah solusi dari ketaksamaan Lyapunov sedemikian sehingga

$$\bar{A}U + U\bar{A}^T + \bar{B}\bar{B}^T < 0, \quad \bar{A}^T V + V\bar{A} + \bar{C}^T \bar{C} < 0. \quad (15)$$

Selanjutnya diasumsikan bahwa terdapat matriks-matriks non singular T_1 dan T_2 sedemikian sehingga

$$T_1 U_1 T_1^T = T_1^{-T} V_1 T_1^{-1} = \Sigma_g = \text{diag}(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n), \xi_1 \geq \xi_2 \geq \dots \geq \xi_n$$

$$\text{dan } T_2 U_2 T_2^T = T_2^{-T} V_2 T_2^{-1} = \Sigma_k = \text{diag}(\Sigma_{k1}, \Sigma_{k2}),$$

dengan $\Sigma_{k1} = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r), \Sigma_{k2} = \text{diag}(\sigma_{r+1}, \sigma_{r+2}, \dots, \sigma_m), \sigma_r > \sigma_{r+1}$ dan $\sigma_j \geq \sigma_{j+1} (j = 1, 2, \dots, m)$ adalah nilai singular dari pengendali K .

Realisasi ruang keadaan pengendali yang setimbang dapat dituliskan sebagai

$$K = \begin{bmatrix} T_2 A_K T_2^{-1} & : & T_2 B_K \\ \dots & .. & \dots \\ C_K T_2^{-1} & : & O \end{bmatrix}.$$

2. Membartisi realisasi setimbang pengendali yang bersesuaian dengan $\Sigma_k = \begin{bmatrix} \Sigma_{k1} & 0 \\ 0 & \Sigma_{k2} \end{bmatrix}$ sebagai berikut

$$K = \begin{bmatrix} A_{k11} & A_{k12} & : & B_{k1} \\ A_{k21} & A_{k22} & : & B_{k2} \\ \dots & \dots & : & \dots \\ C_{k1} & C_{k2} & : & O \end{bmatrix}$$

dengan A_{k1} dan $\Sigma_1 \in R^{r \times r}$. Persamaan dinamik pengendali berorde tinggi setimbang dapat ditulis sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{k1}(t) \\ \dot{x}_{k2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{k11} & A_{k12} \\ A_{k21} & A_{k22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k1}(t) \\ x_{k2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{k1} \\ B_{k2} \end{bmatrix} y(t), u(t) = \begin{bmatrix} C_{k1} & C_{k2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k1}(t) \\ x_{k2}(t) \end{bmatrix}, x_{k1}(t) \in R^r, x_{k2}(t) \in R^{m-r}$$

3. Lakukan pemotongan *state* pada realisasi setimbang pengendali tersebut yang bersesuaian dengan nilai singular kecil, sehingga diperoleh pengendali tereduksi berorde rendah r , dengan persamaan dinamik seperti berikut.

$$\dot{x}_{k1}(t) = \tilde{A}_k x_{k1}(t) + \tilde{B}_k y(t), u(t) = \tilde{C}_k x_{k1}(t) + \tilde{D}_k y(t),$$

dengan $\tilde{A}_k = A_{k11}, \tilde{B}_k = B_{k1}, \tilde{C}_k = C_{k1}, \tilde{D}_k = O$.

HASIL SIMULASI

Berikut diberikan aplikasi pengendali berorde rendah pada struktur elastis dan selanjutnya dibandingkan kinerja pengendali berorde rendah yang diperoleh melalui cara 1 dan cara 2. Persamaan matriks dari pergerakan struktur elastis [8], dapat ditulis dalam bentuk persamaan diferensial orde 2 sebagai berikut.

$$M_p \ddot{x}_0(t) + C_p \dot{x}_0(t) + K_p x_0(t) + d_p \ddot{z}(t) + b_p f(t) = 0, \quad (16)$$

dengan x_0 adalah vektor keadaan, M_p, C_p , dan K_p masing-masing adalah matriks inersia, redaman,

dan kekakuan dari struktur. d_p adalah gangguan untuk percepatan eksitasi \ddot{z} dan b_p adalah matriks input untuk gaya kendali f . Struktur elastis tersebut merepresentasikan bangunan bertingkat yang mempunyai 4 lantai.

Pengendali dirancang dengan tujuan meminimasi peaks fungsi alih terbuka pada mode pertama dan kedua, oleh karenanya, diterapkan fungsi bobot *high pass filter*. Persamaan fungsi bobot tersebut adalah

$$W_H = \frac{s^4 + 4\xi_r \omega_r s^3 + 2(2\xi_r^2 + 1)\xi_r^2 s^2 + 4\xi_r \omega_r^3 s + \omega_r^4}{s^4 + 4\xi_t \omega_t s^3 + 2(2\xi_t^2 + 1)\omega_t^2 s^2 + 4\xi_t \omega_t^3 s + \omega_t^4},$$

dengan s adalah operator Laplace, $Lev = 90$, $\omega_r = 6\pi$, $\xi_r = 0.6$, $\omega_t = 36\pi$, $\xi_t = 0.6$. Selanjutnya dapat diperoleh plant berorde 30, linear, invarian terhadap waktu, minimal, dan stabil asimtotik dengan persamaan dinamik seperti berikut.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t) + Du(t).$$

Kemudian, dicari pengendali berorde rendah (kurang dari 30) dengan menggunakan cara 1 (reduksi orde plant) dan cara 2 (reduksi orde pengendali), dengan langkah-langkah seperti yang telah dikemukakan pada bagian sebelumnya. Norm H_∞ dari selisih plant semula dengan plant tereduksi diberikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Norm H_∞ dari kesalahan reduksi

Orde Plant Tereduksi	$\ G_n(s) - G_r(s)\ _\infty$	$2tr\Sigma_2$
24	1.053	4.405
12	68.552	307.549
10	91.101	463.289

Tabel 2. Norm H_∞ dari degradasi kinerja sistem lup tertutup

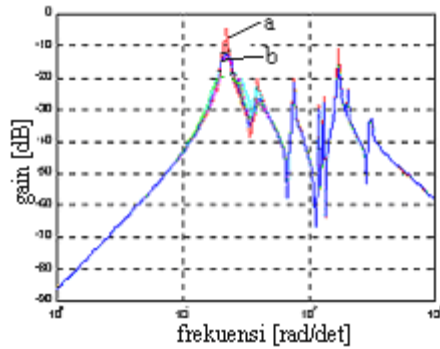
Orde Pengendali Tereduksi	$\ T_{zw} - T_{zw_r}\ _\infty$	$2tr\Sigma_2$
25	5.3E-012	5.2E-009
10	1.0E-002	3.7E-002
7	1.7E-002	8.4E-002

Dari Tabel 1 terlihat bahwa untuk cara 1, norm H_∞ kesalahan reduksi tersebut senantiasa kurang dari 2 kali nilai singular yang dipotong ($2tr\Sigma_2$). Degradasi kinerja sistem lup tertutup sebagai akibat penerapan pengendali tereduksi (cara 2) diberikan pada Tabel 2. Dari tabel tersebut terlihat bahawa batas atas terkecil dari degradasi kinerja sistem lup tertutup kurang dari 2 kali nilai singular yang dipotong.

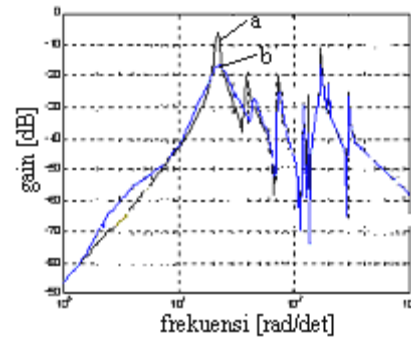
Tabel 3. Norm H_∞ dari sistem lup tertutup dengan pengendali berorde rendah

(a). Cara 1		(b). Cara 2	
Orde Plant Tereduksi	$\ T_{zw}\ _\infty$	Orde Pengendali Tereduksi	$\ T_{zw_r}\ _\infty$
24	23.778	25	23.7991
11	27.277	9	22.5481
10	28.096	7	22.2741

Norm H_∞ dari sistem lup tertutup dengan beberapa pengendali tereduksi dengan cara 1 dan cara 2 diberikan pada Tabel 3. Dari tabel diatas terlihat bahwa secara umum norm H_∞ dari sistem lup tertutup dengan pengendali tereduksi untuk cara 2 lebih kecil dari pada cara 1. Hal ini mengindikasikan bahwa kinerja pengendali berorde rendah yang diperoleh dengan cara 2 lebih baik daripada cara 1.



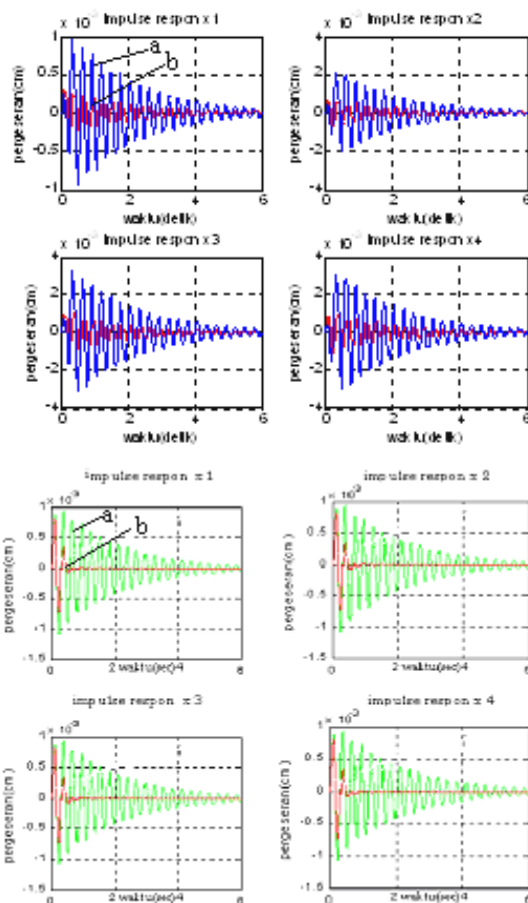
(A). Cara 1



(B). Cara 2

Gambar 2. Respon lup terbuka dan tertutup (a: tanpa pengendali, b: dengan pengendali)

Respon frekuensi dari sistem lup terbuka (tanpa pengendali) dan lup tertutup (dengan pengendali) diberikan pada Gambar 2. Dari gambar tersebut terlihat bahwa pengendali berorde 10 yang diperoleh pada cara 1 mampu meminimisasi mode pertama kurang lebih 8 dB dan mode kedua sekitar 6 dB (Gambar 2 A). Sedangkan pada cara 2, pengendali berorde 7 yang diperoleh pada cara 2 mampu meminimisasi mode pertama dan ke dua kurang lebih 12 dB dan 8 dB (Gambar 2B).



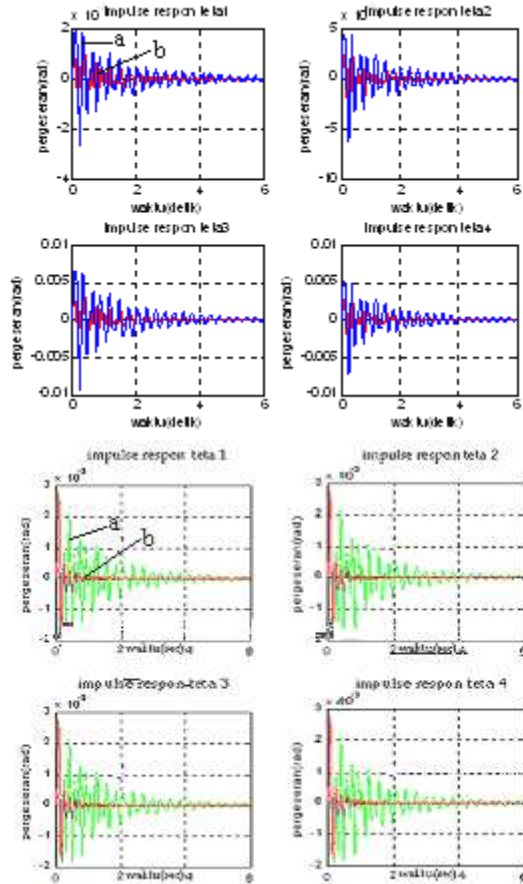
(A). Cara 1

(B). Cara 2

Gambar 3. Respon impuls pergeseran transversal (a: tanpa pengendali, b: dengan pengendali)

Respon impuls dari pergeseran dalam arah transversal dan pergeseran torsional pada setiap lantai diberikan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Dari gambar tersebut terlihat kinerja pengendali dalam meredam

getaran. Pada cara 2 terlihat pengendali mampu menstabilkan sistem dalam waktu kurang lebih 1 detik, sedangkan pada cara 2 dalam waktu kurang lebih 3,5 detik.



(A). Cara 1

(B). Cara 2

Gambar 4. Respon impulsu pergeseran torsional (a: tanpa pengendali, b: dengan pengendali)

KESIMPULAN

Dalam makalah ini telah dibahas suatu pendesainan pengendali berorde rendah melalui reduksi orde plant dan orde pengendali. Telah diverifikasi bahwa batas atas terkecil kesalahan reduksi dan degradasi kinerja sistem lup tertutup sebagai akibat penerapan pengendali tereduksi adalah kurang dari dua kali nilai singular yang dipotong. Dari hasil simulasi telah diperlihatkan bahwa pengendali berorde rendah yang diperoleh melalui cara 2 (reduksi orde pengendali dengan menggunakan metode pemotongan setimbang) memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan cara 1 (reduksi orde plant dengan menggunakan metode pemotongan setimbang).

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Doyle, J.C, Glover, K, Khargoneker, P, Francis, B.A, State space solution to standar H_2 and H_∞ control problem, *IEEE Transaction on Automatic Control problem*, Vol. AC-34, No.8, pp 831-847, 1989.
- [2]. Enns, D.F, Model Reduction with Balanced Realization, an Error Bound and a Frequency Weighted Generalization, *Proceeding of 23 rd Conference on Decisi and Control Las Vegas, NV*, pp 127-132, 1984.

- [3]. Gawronski., W, *Balanced Control of Flexible Structure*, Springer-Verlag, London Limited, 1996.
- [4]. Green, M., Limebeer, D.J.N, *Linier Robust Control*, Prentice-Hall, Inc, 1995.
- [5]. Moore., B. C., Principle Component Analysis in Linier System, Controllability, Observability, and Model Reduction, *IEEE Transaction on Automatic Control*, Vol AC-26, pp 17-31, 1981.
- [6]. Saragih.,R, and Yoshida, K., Reduced Order Controller of Transverse – Torsional Coupled and Vibration Based on Linier Matrix Inequalities, *Journal of Vibration and Control*, Sage Publication, Inc, Vol. 5, pp. 907-923, 1999.
- [7]. Zhou, K., Doyle, J.C, *Essential of Robust Control*, Prentice-Hall, Inc, 1998.
- [8]. Zhou, K., D’Souza, C., and Cloutier, J.R., Structurally balanced controller order reduction with guaranteed closed loop performance, *System and Control letters*, Vol. 24, pp. 235-242, 1995.